

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE CORTE PARA A FURAÇÃO DE LAMINADOS COMPÓSITOS

Guimarães, J. L. [1], Baptista, A. M. [1], Alves, J. L. [1], Gonçalves, D. J. S. [2], Durão, L. M. P. [2], Almeida, J. [3]

[1] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto / INEGI – falves@inegi.up.pt

[2] Instituto Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, CIDEM – lmd@isep.ipp.pt

[3] Frezite Metal Tooling, Trofa, Portugal

Resumo

A crescente utilização de compósitos laminados no mais variado tipo de estruturas tem levado as diferentes indústrias que trabalham com este sector a desenvolver soluções que permitam manter os níveis de qualidade de fabrico. Nesse sentido, a existência de ferramentas específicas para a execução de furos nas placas tem ganho especial relevância. A natureza anisotrópica dos compósitos torna-os mais susceptíveis à ocorrência de diversos tipos de dano, tais como delaminações, que são de evitar pois provocam uma perda das características mecânicas das peças na zona de ligação. Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a influência do número de cortantes da broca sobre a evolução das forças axiais durante a furação e posterior medição das rugosidades na parede do furo. Para esta comparação recorre-se ao método Taguchi. Outro aspecto importante a nível industrial é a duração da ferramenta sendo apresentados resultados ao nível do desgaste observado nas ferramentas ensaiadas neste trabalho. Os resultados permitem mostrar algumas conclusões sobre geometria de broca e parâmetros de corte.

Palavras-chave: *compósitos, furação, ferramentas, desgaste, delaminação.*

1. INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica está constantemente à procura de obter reduções no peso das estruturas, para lograr melhorias nas características dinâmicas das aeronaves. A forma mais eficiente de conseguir tais ganhos de peso na estrutura é através da selecção de materiais de menor densidade. Esta é a razão pela qual os PRF – polímeros reforçados com fibras – se tornaram apetecíveis. A substituição de painéis metálicos por peças em PRF tem vindo a crescer de forma segura ao longo das últimas décadas. Tal substituição deve-se ao alargamento dos conhecimentos relacionados com o uso de materiais multicamadas na indústria aeronáutica, tais como os aglomerados compósito/metal. Este tipo de materiais caracteriza-se por uma elevada resistência específica quando comparados com as tradicionais ligas de alumínio ou titânio. Não constitui surpresa o facto dos compósitos de matriz polimérica serem utilizados neste tipo de aglomerados. De entre os diversos tipos de compósitos, os PRFC (polímeros reforçados com fibra de carbono) são os mais frequentes. Este tipo de compósito é normalmente usado em placas fabricadas a partir de pré-impregnados, sendo as suas camadas empilhadas numa sequência de acordo com uma determinada configuração. A orientação relativa de cada camada permite a obtenção de propriedades previamente definidas para a peça, como por exemplo a resistência, a rigidez ou outras. A principal operação de maquinagem realizada nestas peças

é a furação, que se torna necessária para permitir a montagem destas placas em estruturas. Esta operação de maquinagem pode causar diferentes defeitos nas peças tais como a delaminação, arrancamento das fibras, descolamento fibra/matriz e danos térmicos (Hocheng & Tsao, 2005; Lopez de Lacalle et al, 2000). Qualquer um destes defeitos pode causar a rejeição da peça ou levar à necessidade de operações adicionais de maquinagem, aumentando o seu custo final em qualquer dos casos. De acordo com dados relativos à indústria aeronáutica, tais custos podem ascender a 30% do custo total das peças (Stone & Krishnamurthy, 1996). Dos diversos danos habituais após maquinagem, a delaminação é considerado o mais severo pois pode reduzir a resistência mecânica ou à fadiga destes componentes, pelo que se torna necessário minimizá-lo (Persson et al, 1997; Piquet et al, 2000). São conhecidos diversos estudos com o objectivo de reduzir a delaminação na furação de materiais compósitos ou de analisar o efeito de diferentes factores na sua ocorrência (Hocheng & Tsao, 2005; Tsao & Hocheng, 2007; Durão et al, 2008a; Fernandes & Cook, 2006a,b). O emprego de técnicas estatísticas combinadas com critérios de optimização permite afirmar a vantagem no uso de espessuras de ponta reduzidas, o recurso ao furo-guia ou à utilização de placas sacrificiais colocadas pelo lado de saída da broca (Abrão et al, 2007; Tsao & Hocheng, 2008; Durão et al, 2008b, Davim & Reis, 2003; Tsao & Hocheng, 2005). Em todas estas soluções, pretende-se diminuir a força de corte ou aumentar o valor desta para o qual se verifica o aparecimento da delaminação. Os principais factores para a redução da delaminação, por via da redução da força de corte, são o avanço e a geometria da broca.

Apesar da sua aparente simplicidade, a furação é um processo complexo, no qual intervêm diversos factores, relacionados com a geometria da broca, com o facto de as arestas cortantes trabalharem no interior da peça e com o processo de remoção da apar. Só em relação à geometria da broca pode-se referir o ângulo de hélice, o ângulo da ponta, o ângulo de folga, o ângulo de ataque, a espessura da ponta, o número de arestas cortantes e outros. Devem ser ainda tidas em conta as necessidades de lubrificação e arrefecimento da ferramenta. A acção mecânica exercida pela broca deforma plasticamente a zona em redor da superfície do furo. Estas pequenas irregularidades aumentam a probabilidade de se verificar uma iniciação de fissura, devido ao aumento de tensões localizado.

O principal objectivo do trabalho proposto é a criação de uma metodologia de análise da qualidade dos furos executados que seja aplicável numa perspectiva de caracterização de novas geometrias de broca que permitam aumentar a produtividade por via da utilização de parâmetros de corte mais elevados, sem prejudicar a qualidade do produto acabado, isto é, os furos nas placas. Assim, a minimização da delaminação é considerado um bom indicador de qualidade. Neste trabalho são mostrados os resultados obtidos na comparação, com o auxílio do método TAGUCHI, de duas geometrias de broca cuja principal diferença é o número de arestas cortantes, respectivamente duas – Z2 – e quatro – Z4. A comparação é feita através da monitorização das forças axiais durante a furação, da medição das rugosidades superficiais das paredes do furo e da análise das superfícies de desgaste das brocas.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 Fabrico das placas

Num compósito identificam-se dois constituintes: uma matriz e um reforço. A matriz tem como função garantir a estabilidade dimensional e química do compósito, conferir-lhe forma e proteger as fibras de reforço das condições ambientais. O material de reforço assegura a estrutura interna do compósito a nível das suas propriedades mecânicas, tais como a resistência a esforços ou a rigidez. Para a realização deste trabalho foram utilizadas placas em resina epóxida reforçada com fibra de carbono, fornecida na forma de pré-impregnado pela empresa SEAL, referência CC160 ET443 Carbon Fabric Prepreg.

Considerando o tipo de trabalhos que se pretendia levar a cabo, foram fabricadas placas do tipo “cross-ply”, isto é com as sucessivas camadas orientadas a 90° em relação à anterior e uma espessura final nominal de 4 mm. Assim o empilhamento do pré-impregnado foi de 24 camadas com a sequência [0/90]. O ciclo de cura das placas, efectuado numa prensa de pratos quentes, encontra-se representado na figura 1.

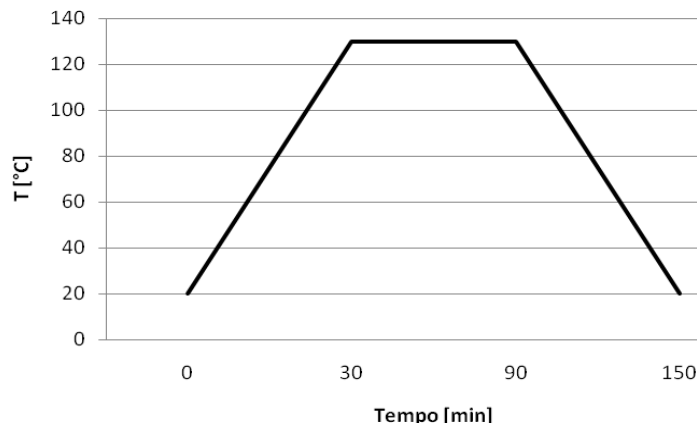


Figura 1 – Ciclo de cura das placas de carbono.

Após o fabrico e cura das placas, estas foram cortadas em peças de 165 x 96 mm², adequadas à realização dos trabalhos de furação. O corte das placas foi efectuado numa máquina equipada com discos diamantados e sistema de refrigeração por circulação de fluido.

2.2 Furação e monitorização de forças axiais

A maquinagem foi realizada num centro de maquinagem DENFORD TRIAC CENTRE, de 3,7 kW, com uma velocidade de rotação máxima de 7500 rpm, avanços desde 0,0001 a 2 m/min e cone BT-30 com aperto pneumático. Em todos os ensaios, e sempre que alterada alguma condição, foi verificada a excentricidade do corpo da broca, tendo sido obtidos resultados entre 0,01 mm para o cone e 0,02 mm para a broca.

Numa primeira fase, foi decidido utilizar uma velocidade de corte de 60 m/min (cerca de 3200 rpm) e avanços entre 0,02 e 0,06 mm/rot, em brocas de 6 mm de diâmetro, única dimensão ensaiada nesta etapa do trabalho. Posteriormente, e com a intenção de avaliar a capacidade de corte das brocas, foram utilizadas condições de corte mais severas – 6000 rpm e 0,12 mm/rot, no caso mais extremo. Para analisar o efeito da maquinagem no desgaste das superfícies da broca foi efectuada uma série longa de 540 furos.

2.3 Rugosidade das superfícies maquinadas

As medições das rugosidades nas paredes do furo foram realizadas num Rugosímetro Hommelwerke LV-50 com os seguintes parâmetros: $L_t = 1,5$ mm; $L_c = 0,25$ mm e $v_t = 0,15$ mm/s. Foram registados os valores de R_a , rugosidade média aritmética, R_z , média das cinco maiores diferenças pico-vale e $R_{máx}$, máxima diferença pico-vale. O posicionamento da placa face ao rugosímetro foi garantido através de um suporte adequado.

Para o cálculo dos valores de rugosidade apresentados, foram efectuadas três medições na parede de cada furo. Os resultados referem-se à média aritmética dessas três medições.

2.4 Análise das superfícies de desgaste das brocas

A análise superficial das brocas, foi efectuada através de medições de rugosidade nas superfícies de topo, e de uma análise visual de várias séries de macrografias.

As medições de rugosidade foram efectuadas com o auxílio de um rugosímetro HOM-MELWERKE T8000 e as macrografias com um microscópio óptico OLYMPUS SZH.

2.5 Utilização do Método Taguchi

O Método TAGUCHI, desenvolvido nos anos 80, consiste numa filosofia que introduz a planificação experimental e desenvolvimento de métodos de custo com o objectivo de obter a combinação óptima de parâmetros e suprimir o impacto das causas. (Taguchi, 1990; Ross, 1996)

Uma componente chave do Método TAGUCHI é a redução de variabilidade em torno do valor nominal para cada produto ou processo e a base fundamental do método é a definição de função-perda. Esta tem como objectivo determinar quantitativamente a perda de qualidade devido a variações funcionais.

Existem três tipos de função perda: “maior é melhor”, “nominal é melhor” e “menor é melhor”. Neste caso foi usado “menor é melhor”, visto o objectivo do trabalho ser a minimização da força axial aplicada na furação. Com base na função-perda, Taguchi construiu diversos coeficientes SN a que chamou sinal-ruído, sugerindo que a maximização desses quocientes constituía a via de minimização da função-perda.

Neste caso o quociente resulta na seguinte expressão matemática:

$$S / N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Na análise do ensaio existem dois casos possíveis: o factorial saturado (em que são estimados todos os efeitos dos factores principais e de todas as interacções, todos ortogonais entre si) e as fracções de factorial (em que somente é utilizada uma parte de todas as interacções possíveis). A matriz ortogonal L8 foi a utilizada no nosso estudo (Ross, 1996).

3. RESULTADOS

3.1 Monitorização de forças axiais

O trabalho experimental dividiu-se em duas fases: execução dos furos tendo em vista a aplicação do método Taguchi na comparação das brocas de dois e quatro cortantes e séries longas de 540 furos com a mesma broca para análise do desgaste da ferramenta. A figura 2 apresenta a evolução da força axial máxima durante a furação numa broca de dois cortantes. Como se pode observar, existe uma tendência para o aumento da força máxima com o número de furos. Este resultado pode ser explicado pelo desgaste provocado pelo corte das fibras, de natureza abrasiva. Idêntica situação foi observada com o avanço mais elevado - 0,06 mm/rot.

De notar que, em virtude da oscilação das forças ao longo de uma rotação da broca, própria do processo de furação, o valor da força considerado em cada momento é o resultado do cálculo da média móvel ao longo dessa rotação.

A força máxima é sempre atingida numa fase em que a ponta da broca ainda não atravessou totalmente a placa, correspondendo ao maior esforço de corte.

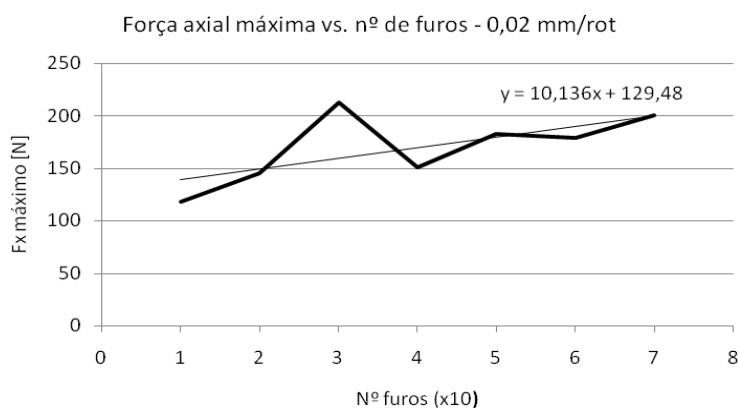


Figura 2 – Medição de força máxima na furação – Broca Z2, avanço 0,02 mm/rot.

3.2 Aplicação do método Taguchi

As tabelas I e II apresentam a descrição da experiência realizada para aplicação do método Taguchi, matriz L8, com o objectivo de comparar forças axiais em função das velocidades de avanço e de corte para os dois tipos de brocas utilizadas.

Tabela I – Condições experimentais – factores e níveis.

	avanço [mm/rot]	broca	velocidade [rpm]
	A	B	C
Nível A	0.06	Z2	3200
Nível B	0.12	Z4	6000

Tabela II – Planeamento de Experiências

EXPERIÊNCIA	AVANÇO		BROCA	VELOCIDADE [rpm]
	[mm/rot]	[mm/min]		
1	0,06	192	Z2	3200
2	0,06	360	Z2	6000
3	0,06	192	Z4	3200
4	0,06	360	Z4	6000
5	0,12	384	Z2	3200
6	0,12	720	Z2	6000
7	0,12	384	Z4	3200
8	0,12	720	Z4	6000

A tabela III mostra os resultados obtidos nessa experiência. De destacar a maior influência do factor broca e do factor avanço quando comparados com os restantes factores ou mesmo interações entre estes.

Tabela III – Resultados obtidos pela aplicação do método Taguchi.

	avanço	broca	av/broca	velocidade	av/vel	broca/vel
	A	B	AB	C	AC	BC
NÍVEL A	166,6	159,0	202,7	186,6	196,6	197,1
NÍVEL B	222,6	230,2	186,4	202,5	192,6	192,0
DIF	56,0	71,2	16,3	16,0	4,0	5,1

De acordo com os resultados experimentais e as condições estabelecidas previamente, a melhor combinação a nível de minimização de forças axiais é a seguinte: avanço de 0,06 mm/rot, broca de dois cortantes, velocidade de corte de 60 m/min ou 3200 rpm.

3.3 Análise da rugosidade das superfícies maquinadas

A figura 3 mostra os valores de R_a , rugosidade média aritmética, obtidos nas paredes dos furos, para os primeiros 300 furos da série de 540 furos consecutivos nas condições de corte seleccionadas. De notar que o desgaste das arestas cortantes da ferramenta vai ter como consequência esperada o aumento dos valores medidos de rugosidade, embora de uma forma muito ténue, em resultado da abrasividade das fibras de reforço. Os valores obtidos não parecem confirmar tal resultado.

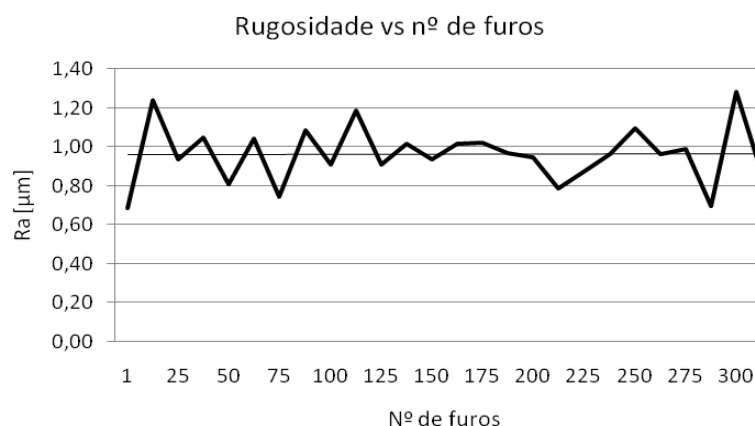


Figura 3 – Variação de R_a (rugosidade média aritmética) nos furos da broca Z2, com um avanço de 0,02 mm/rot e 6000 rpm, ao longo de 300 furos.

3.4 Superfícies de desgaste das brocas

A análise às superfícies de desgaste das brocas, tal como foi referido em 2.4, foi efectuada através de medições de rugosidade e por análise visual com o auxílio do registo de macrografias. Os valores obtidos para os dois tipos de brocas estão indicados na figura 4.

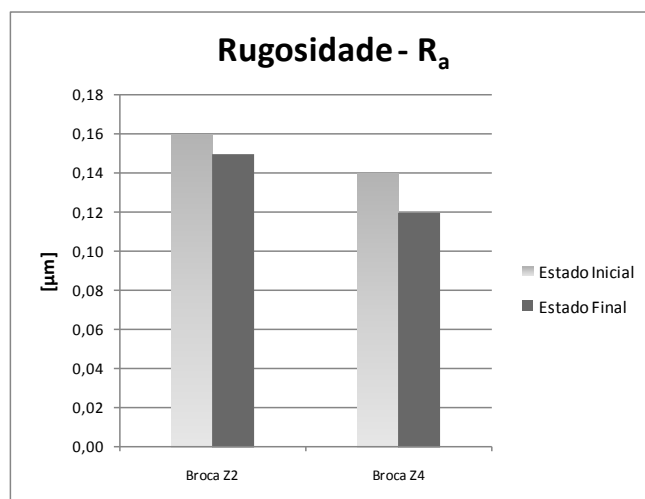


Figura 4 – Medições de R_a (rugosidade média aritmética) para as brocas Z2 e Z4.

Após análise das referidas medições, conclui-se que para a broca Z2 (que no estado inicial já tinha efectuado 72 furos com um avanço de 0,04 mm/rot e uma velocidade de rotação de 3200 rpm) e que no estado final havia executado 540 furos com um avanço de 0,2 mm/rot a 6000 rpm, tem um desgaste quase irrelevante, uma vez que a variação entre os dois estados difere em 0,01 μm . O mesmo se passou para a broca Z4, que após 180 furos executados com parâmetros a variar entre os 0,02 e os 0,2 mm/rot para o avanço e entre 3200 e 6000 rpm para a velocidade de rotação, variou apenas 0,02 μm . Estes valores para a variação de rugosidade são realmente desprezáveis, embora se possa considerar um ligeiro arredondamento e polimento das faces que maquinaram as placas de material compósito utilizadas.

Quanto à análise visual, as diferenças entre as brocas, antes e depois de maquinar são mais evidentes. Consta-se um arredondamento das arestas de corte, bem visível nas figuras 5 e 6, neste caso para as brocas Z4 no seguimento das setas indicadas a traço contínuo, e um possível aquecimento marcado por uma linha paralela à aresta de corte que primeiro contacta a placa a maquinar, indicado pela seta a traço descontinuo.

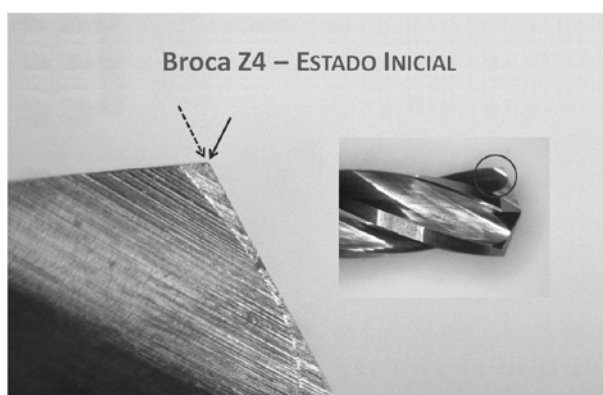


Figura 5 – Exemplo de aresta de corte – Broca Z4.

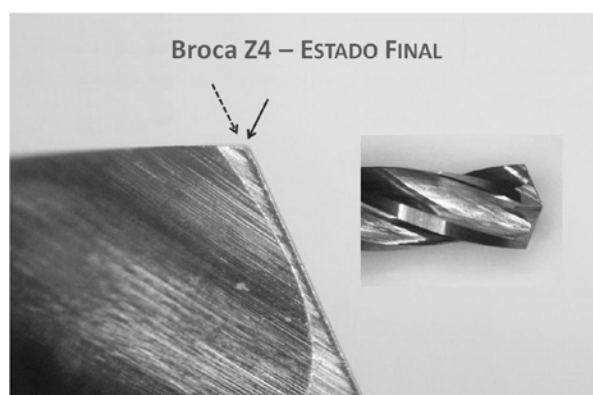


Figura 6 – Exemplo de aresta de corte – Broca Z4.

4. CONCLUSÕES

Esta comunicação apresenta os resultados preliminares de um trabalho de investigação de desenvolvimento de ferramentas optimizadas para a furação de laminados compósitos. Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- os valores de força máxima durante a furação aumentam com o desgaste da broca;
- os valores de rugosidade das paredes maquinadas não apresentam qualquer tendência considerável de variação;
- as brocas resistiram a séries de 540 furos sem desgaste apreciável;
- a metodologia apresentada pode estabelecer um resultado para o tempo de vida da broca em função do desgaste medido e do número de furos executado em determinadas condições;
- as brocas de quatro cortantes, nas condições experimentais referidas, não apresentam uma vantagem decisiva face à construção tradicional com dois cortantes;
- a estes resultados devem ser acrescentadas as análises à extensão da zona delaminada, para uma mais completa informação sobre as melhores condições de corte e desgaste das arestas cortantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio dado pela AdI, através do projecto SIME I&DT 00/23041, “Desenvolvimento de Novas Ferramentas para Madeira e Metal”, pelas Oficinas Mecânicas do Dept. Engenharia Mecânica do ISEP e pelo Eng. Avelino S. Dias Machado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, A. M.; FARIA, P. E. et al. **Drilling of fiber reinforced plastics: A review**, Journal of Materials Processing Technology v.186, p. 1–7, 2007.
- DAVIM, J. P; REIS, P. **Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study**. Materials and Design, v. 24, p. 315-324, 2003.
- DURÃO, L. M. P.; TAVARES, J. M. R. S. et al. **Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling**, Int. Journal of Materials and Product Technology, v. 32, p. 226-242, 2008.
- DURÃO, L. M. P.; MAGALHÃES, A. G. et al. **Drilling of fiber reinforced plastic laminates**, Materials Science Forum, v. 587-588, p. 706-710, 2008.
- FERNANDES, M.; COOK, C. **Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque**, International Journal of Machine Tools & Manufacture v. 46, p. 70–75, 2006.
- FERNANDES, M.; COOK, C. **Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part II: empirical modeling of maximum thrust force**, International Journal of Machine Tools & Manufacture v. 46, p. 76–79, 2006.
- HOCHENG, H.; TSAO, C.C. **The path towards delamination-free drilling of composite materials**, Journal of Materials Processing Technology v. 167, p. 251–264, 2005.
- HOCHENG, H.; TSAO, C.C. **Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials**, International Journal of Machine Tools & Manufacture v. 46, p. 1403–1416, 2006.
- LOPEZ DE LACALLE, L. N.; PEREZ, J. et al. **Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys**, Journal of Materials Processing Technology v. 100, p. 1-11, 2000.
- PERSSON E; ERIKSSON I. et al. **Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates**. Composites A, v. 28, p. 141-151, 1997.
- PIQUET, R.; FERRET., B. et al. **Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills**, Composites A, v.31, p. 1107–1115, 2000.
- ROSS, P. J., **Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design**, McGraw-Hill, New York, 1996.
- STONE R; KRISHNAMURTHY K. **A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 36, p. 985-1003, 1996.
- TAGUCHI, G., **Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes**, Asian Productivity Organization, 1990.
- TSAO C. C; HOCHENG H. **Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 45, p. 1261-1270, 2005.
- TSAO, C.C; HOCHENG, H. **Parametric study on thrust force of core drill**, Journal of Materials Processing Technology v. 192–193, p. 37–40, 2007.
- TSAO, C.; HOCHENG, H **Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network**, Journal of Materials Processing Technology, v. 203, p. 342–348, 2008.